

## **ОТ АВТОМАТИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ К МАШИННОМУ ОБУЧЕНИЮ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Р.И. Юсупов, В.В. Фёдоров, Р.О. Черепанов, И.Ю. Кузьменко, В.А. Юркина,  
Хань Цзэли, В.А.Клименов*

*Р.И. Юсупов, аспирант гр.А0-21,  
Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,  
E-mail: [yusupov7@tpu.ru](mailto:yusupov7@tpu.ru)*

Несмотря на широкое распространение аддитивных технологий в различных областях промышленности и медицины, в том числе и с применением металлов и их сплавов, однако существует много проблем, которые необходимо решить с целью надёжного и уверенного применения напечатанных деталей в ответственных изделиях. Сложность проблем, которые необходимо решить для внедрения технологий 3Д-печати, обусловлено тем, что в случае применения металлических материалов, приходится использовать высокоэнергетические источники, такие как лазеры и электронные лучи. Организация самого процесса печати, когда проводится послойное сплавление порошка или проволоки сканирующим электронным или лазерным лучом, обуславливает сложность процессов формо- и структурообразования, которые трудно описать с позиций классической металлургии. Формирующиеся в таких условиях металлы и сплавы обладают специфической макро и микро структурой и дефектностью, которые и определяют неоднородность и анизотропию свойств материала изделия. Естественно, что в таких условиях велика роль автоматизации процессов, а моделирование необходимо для предсказания условий, в которых происходит структуро- и фазо-образование материала, и прогнозирование свойств.

В ТПУ разрабатывается собственное электронно-лучевое оборудования для осуществления 3Д-печати порошковыми материалами и проволокой [1]. Для управления установкой было разработано программное обеспечение, которое предназначено для управления установкой для электронно-лучевого сплавления металлических порошков в условиях вакуума [2]. Программа обеспечивает сбор информации с датчиков вакуума, управление линейным перемещением манипулятора, отклонением пучка посредством G-code, ввод параметров силы тока фокусировки и напряжения ускорения.

С физической точки зрения важны термические условия на всех стадиях нагрева и оплавления материала при электронно-лучевом воздействии и условия кристаллизации материала при охлаждении. Для анализа таких условий наиболее подходящим является применение численных методов для изучения протекающих процессов, причём как с использованием стандартных программ, так и на основе собственных подходов [3].

С развитием компьютерных технологий, таких как нейронные сети и машинное обучение на их основе, стало возможным предугадывать появление нужных свойств материалов [4]. Более того, основные проблемы при изготовлении конструкций методом ЭЛАП, такие как раковины, появление пор, текучесть металла, можно смоделировать и устранить на цифровых двойниках. По сути, имея множество данных о расплаве материала в ванне, мощности луча и подачи проволоки – можно построить математическую модель. Но имея огромное их количество, причем данные приходится обрабатывать не только в виде цифр, но и в виде изображений, полученные с фото-видео-камер, задачи становятся трудоемкими. На помощь приходит машинное обучение, которое можно внедрить не только в банках, аэропортах и биржах, но и в аддитивном производстве [5]. На основе уже имеющихся точных данных, программа выстраивает не уже написанный алгоритм работы системы, а строит свой алгоритм. Затем создаются тестовые образцы данных и по ним калибруется поведение программы. Здесь уже прослеживается следующая закономерность: чем больше данных мы обрабатываем, тем лучше и точнее будет вести себя алгоритм. При проведении экспериментов с электронно-лучевым сплавлением проволоки гораздо удобнее

будет обрабатывать видео и фотоизображения, так как их можно получать в режиме реального времени, что способствует быстрой корректировке режимов сплавления для обеспечения заданных характеристик получаемого изделия. Поступающие данные на ЭВМ, обрабатываются через алгоритм нейросетей, сравниваются с уже известными данными, обрабатываются и если необходимо, то выполняется коррекция режимов. В общем случае на сегодняшний день оптимальными, с точки зрения затрат по времени обработки данных, написания программы и необходимых вычислительных мощностей компьютеров, считается метод К-средних [6], метод опорных векторов [7] и система рекомендаций [8]. Введу многообразия методов и подходов к решению задач в машинном обучении, многие из этих методов можно объединить в одну, которая образует в результате нейронную сеть. Такие сети, при должной настройке обеспечат эффективную обработку результатов и корректировку режимов луча, задать нужную скорость подачи проволоки и в результате иметь необходимые свойства материала, причем в любом сечении или отдельном участке конструкции, которую необходимо усилить, либо не нуждается в избыточном материале или его прочности, что поспособствует удешевлению конструкции, уменьшить затраты материала и энергии. С ростом популярности 3D-печати, улучшением оборудования для него и развитием IT отрасли аддитивные технологии необходимо внедрять в машиностроительной отрасли. Такая коллаборация приведет как большему развитию данной отрасли.

#### **Список литературы:**

1. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding / V.V. Fedorov, V.A. Klimenov, A.V. Batranin, P. Ranga // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Vol. 2167, № 1. – P. 020097
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021614248. «Управление установкой электронно-лучевого сплавления порошков»/ Федоров В.В., Кузьменко И.Ю., Юркина В.А., Густомясов М.А., Юсупов Р.И., Клименов В.А./ 2021г.
3. Powder and wire melting of titanium alloys by electron beam / V.V. Fedorov, V.A. Klimenov, R.O. Cherepanov, A.V. Batranin // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 37. – P. 584–591.
4. Аддитивные технологии: журнал (учредитель ООО «ПРОМЕДИА»). – 2016. – №1. – М.: ООО «ПРОМЕДИА». 44 с.
5. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
6. T. Debroy, T. Mukherjee, H. L. Wei, J. W. Elmer and J.O. Milewski, Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing. // Nature Reviews Materials 6(1). – 2020. DOI:10.1038/s41578-020-00236-1
7. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal Graphs and Manifolds, Ch. 2 in: Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques, Emilio Soria Olivas et al. (eds), IGI Global, Hershey, PA, USA, – 2009. – С. 28-59.
8. Aboutaleb, A. M. et al. Accelerated process optimization for laser- based additive manufacturing by leveraging similar prior studies. // IISE Trans. 49, 2017. – С.31–44.